



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/11214>

To cite this version :

Tristan RÉGNIER, Guillaume FROMENTIN, José OUTEIRO, Bertrand MARCON, Alain D'ACUNTO, Arnaud CROLET - Etude de la formation des bavures en coupe orthogonale à l'outil carbure dans un alliage d'Aluminium – Silicium. - 2016

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu





Etude de la formation des bavures en coupe orthogonale à l'outil carbure dans un alliage d'Aluminium – Silicium.

**Tristan REGNIER^(a), Guillaume FROMENTIN^(a),
José OUTEIRO^(a), Bertrand MARCON^(a),
Alain D'ACUNTO^(b), Arnaud CROLET^(c)**

(a) Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés – Arts et Métiers Cluny, rue Porte de Paris, 71250 Cluny, France. Mails : tristan.regnier@ensam.eu, guillaume.fromentin@ensam.eu, jose.outeiro@ensam.eu, bertrand.marcon@ensam.eu

(b) Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux – Arts et Métiers Metz, 4 rue Augustin Fresnel, 57078 Metz, France. Mail : alain.dacunto@ensam.eu

(c) Service D2P usinage – Montupet S.A., 3 rue de Nogent, 60290 Laigneville, France. Mail : arnaud.crolet@montupet-group.com

Résumé : Le but de cet article est d'étudier l'influence des paramètres de coupe sur la formation des bavures en coupe orthogonale. Pour ce faire, une étude en rabotage est réalisée avec des plaquettes carbures, sur un alliage d'Aluminium-Silicium, communément utilisé pour la fonte de culasses automobiles. Cette étude consiste à analyser l'influence de différents paramètres de coupe sur la formation des bavures dans le matériau. Les résultats obtenus permettent de conclure sur l'influence de certains paramètres de coupe sur la formation de la bavure, ainsi que son caractère aléatoire en coupe orthogonale, dû à l'hétérogénéité du matériau.

Mots clés: Formation de bavures, Alliage d'aluminium, Coupe orthogonale, Fraisage.

1 Introduction

Le terme « bavure » est défini par la norme NF ISO 13715 (2000), comme un « reste rugueux de matière laissée à l'extérieur de la forme géométrique idéale d'une arête extérieure soit par l'usinage soit par le procédé de formage ». La formation de bavures est préjudiciable dans l'industrie pour des raisons ergonomiques (risque de coupure), esthétiques, ou fonctionnelles, les bavures pouvant s'arracher et polluer un système mécanique voire le rendre défaillant. Or, l'apparition de bavures lors de l'usinage est un phénomène inévitable et peu contrôlable de nos jours, notamment lorsque les pièces usinées sont ajourées, telles que les culasses. Le processus d'ébavurage nécessitant du temps, il est nécessaire dans un contexte industriel de maîtriser leur formation afin de réduire considérablement les coûts de fabrication des pièces.

Dans le cas général de l'usinage, quatre types de bavures ont été définis par Gillespie (1973) : les bavures Poisson, dues à un refoulement de matière sous un effet indenteur, souvent rencontrées dans les zones où l'outil rentre dans la pièce, les bavures de type « roll-over », induite par un basculement du copeau en sortie de matière, les bavures dues au déchirement entre le copeau et la pièce, ainsi que les bavures de type « cut-off », apparaissant durant le tronçonnage d'une pièce en tournage.

Plusieurs définitions de la taille d'une bavure sont utilisées, la norme NF ISO 13715 (2000) propose de ne mesurer que la longueur de la bavure, or, compte tenu des différentes morphologies de bavures, ce paramètre peut être insuffisant. Schafer (1975) propose une définition complète de la bavure en la décrivant suivant quatre paramètres géométriques que sont la hauteur de bavure, la largeur de la bavure, le rayon de la racine et l'épaisseur de la racine qui, combinés et corrélés permettent de déterminer une valeur de bavure, appelée g , servant de référence. En fonction du caractère ductile ou fragile du matériau usiné, le type de bavure est différent. Hashimura et al. (1999a) ont été les premiers à étudier expérimentalement et numériquement la morphologie des bavures en coupe orthogonale, en fonction du caractère ductile ou fragile du matériau. Il en résulte qu'un matériau fragile formera plutôt une bavure dite « négative » s'apparentant à un chanfrein, alors qu'un matériau ductile formera une bavure « positive », dont la forme s'apparente plutôt à une excroissance débutant sur l'arête de la pièce. Dans cette étude, l'effet du cumul de bavure passe après passe est aussi évoqué. Lorsqu'une bavure est formée, si une deuxième passe d'usinage est effectuée avec une épaisseur coupée plus faible que la racine de cette dernière, la nouvelle bavure formée à une hauteur plus importante que la précédente. Ce phénomène, dû à la ductilité du matériau, est aussi étudié en fraisage par Da Silva et al. (2015), qui démontrent cet effet en comparant un essai de surfacage en 5 passes sans et avec ébavurage entre passes.

Différentes études analytiques ont été réalisées afin d'essayer de comprendre et prédire la formation des bavures. Ko et Dornfeld (1991), en formulant leurs hypothèses suites aux observations réalisées en analysant le comportement de la pâte à modeler ainsi que du cuivre en coupe orthogonale à basse vitesse, ont proposé un modèle décomposé en trois étapes (initiation, développement et formation de la bavure). Ce modèle, basé sur le principe du minimum d'énergie, permet de déterminer assez correctement la hauteur des bavures pour les matériaux ductiles. Cependant, le modèle est assez restrictif quant aux matériaux pouvant être étudiés. Un second type de modélisation analytique est proposé par Toropov et Ko (2006), en analysant le comportement du plan de cisaillement, et notamment son basculement d'un angle positif à un angle négatif en sortie de la matière. Le modèle prédictif est assez proche des résultats expérimentaux obtenus en coupe orthogonale sur du cuivre, cependant ce modèle n'est applicable que sur des matériaux ductiles.

Une analyse des différentes formes de bavures obtenues en fraisage est effectuée par Gillespie (1973), qui identifie le type de bavure des différentes arêtes générées par l'opération. Son analyse permet de mettre en évidence des similitudes entre les bavures de certaines arêtes. Cependant, son analyse ne tient pas compte de la zone d'entrée des dents de la fraise. Bourlet (2016) a démontré que, sur une même arête, quand la vitesse de coupe est plus élevée que la vitesse d'avance, deux types de bavures existent : des bavures d'entrée de dents, de type Poisson et des bavures de sortie de dents.

Quelques études en fraisage se sont attardées sur l'influence des paramètres de coupe sur la taille des bavures. Kishimoto et al. (1981) ont démontré que deux catégories de bavures rencontrées en sortie matière peuvent apparaître. Des bavures longues et faciles à enlever (catégorie I, de type rollover) et des bavures courtes mais épaisses et difficiles à enlever (catégorie II, de type déchirement). Ils démontrent que la catégorie des bavures produites est conditionnée par la section coupée par l'arête de coupe principale. Ainsi, la profondeur de passe axiale et la géométrie d'outil ont un effet considérable sur la catégorie des bavures produites. Il existe alors une profondeur de passe axiale de transition à laquelle les bavures produites passent de la catégorie I à la catégorie II. Au-delà de cette profondeur de passe, les bavures produites sont alors plus courtes. Ces observations ont été confirmées par la suite par Olvera et Barrow (1995) en fraisage épaulé, puis par Da Silva et al. (2015) en surfacage. L'influence de la géométrie d'outil et plus particulièrement de l'angle de coupe radial a été étudiée par Hashimura et al. (1999b), qui concluent sur une forte influence de l'angle sur la taille des bavures de sortie et une augmentation de l'angle de coupe radial diminuant considérablement la taille des bavures.

Cependant, il est à noter qu'en changeant d'angle de coupe mais en gardant les mêmes paramètres géométriques, la séquence de sortie des arêtes est modifiée. C'est pourquoi une étude sur la formation des bavures en coupe orthogonale est proposée dans cet article.

La morphologie des bavures obtenues sera ensuite comparée à celle obtenue lors d'essais de fraisage.

2 Etude en coupe orthogonale

2.1 Objectifs et paramètres de l'étude

Le but de cette première étude est d'analyser l'influence de différents paramètres de la coupe orthogonale sur la taille des bavures obtenues en sortie matière, sur un alliage d'aluminium – silicium, communément utilisé en fonderie.

L'étude est réalisée sur un alliage EN – AC AlSi7Mg0,3+0,5Cu - T6 selon la norme NF EN 1706, fourni par la société Montupet S.A et dont la composition chimique est détaillée dans le tableau 1.

Table 1 : Composition chimique de l'alliage EN - AC AlSi7Mg0,3+0,5Cu – T6

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Autres	Al
6,5 à 7,5	0,19	0,5	0,1	0,25 à 0,45	0,07	0,25	0,1	Reste

Afin de réaliser la coupe, un outil à plaquettes interchangeable en carbure non revêtu est utilisé. Les paramètres de coupe étudiés sont indiqués dans le tableau 2.

Table 2 : Paramètres de l'étude en coupe orthogonale

Paramètres	Valeurs
Vitesse de coupe (v_c)	120 m/min
Profondeur de passe (a_p)	4 mm
Epaisseur coupée (h)	0,01 à 0,2 mm
Angle de coupe normal (γ)	-5° ; 7° ; 20° (α différent) ; 30°
Angle de dépouille normal (α)	5° et 10° (pour $\gamma = 20^\circ$)
Rayon d'arête (r_β)	6 μm ; 18 μm
Lubrification	Sec ; Huile soluble (Blaser B-Cool 755, 7 à 10% d'huile) ; Huile entière (Blaser Vascomill MMS SE1)

2.2 Méthode expérimentale

Le dispositif expérimental, montré en figure 1, consiste à réaliser des passes de rabotage à l'aide de l'axe X d'une fraiseuse 3 axes DMG modèle DMC 85V. L'outil est fixé sur une équerre, elle-même solidaire de l'axe Z de la machine. L'éprouvette est fixée sur un dynamomètre piézoélectrique Kistler modèle 9119 AA2. Afin de vérifier la présence de cumul de bavure ou non, un microscope Keyence VHX est positionné sur la machine de telle sorte que le profil de bavure soit visualisable.

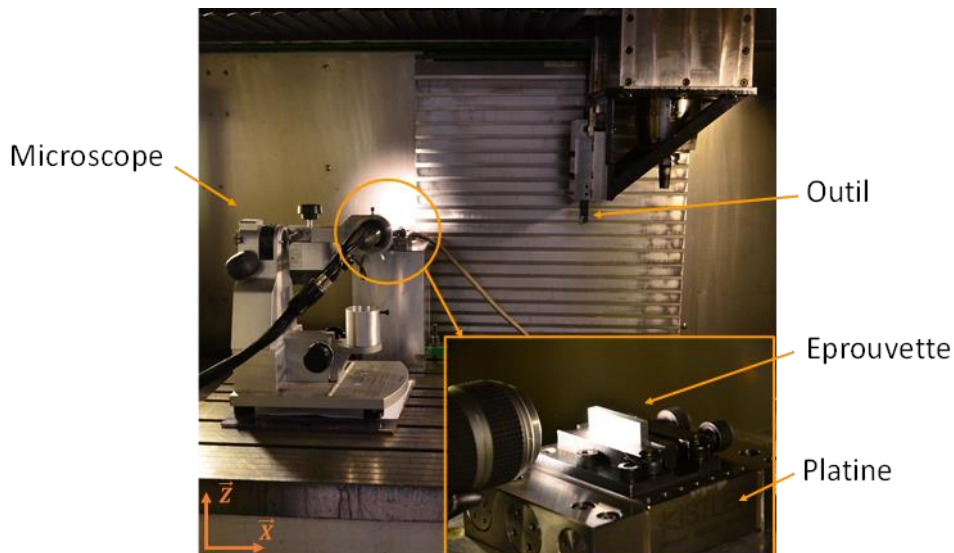


Figure 1 : Dispositif expérimental avec système d'observation.

Après chaque essai, la mesure de la taille des bavures s'effectue à l'aide d'un scan 3D à variation focale Alicona modèle SL. L'éprouvette à analyser est positionnée de façon à ce que le dessous de la bavure soit visible. La référence permettant de mesurer la hauteur de la bavure est donc la surface perpendiculaire à la surface coupée, comme représenté en figure 2a.

2.3 Résultats et analyse

- Morphologie des bavures

Les morphologies des bavures produites en coupe orthogonale sont analysées. L'alliage étudié est connu pour être hétérogène, du fait de la forte proportion de Silicium se plaçant en jointure des dendrites, grains formés dans les alliages aluminium. Cette hétérogénéité se traduit par une disparité de la taille de la bavure, comme représentée sur la figure 2a. Une micrographie de la bavure est aussi proposée en figure 2b et montre bien la rupture de la matière suivant les jointures des dendrites. Une légère déformation plastique des dendrites est cependant aussi révélée.

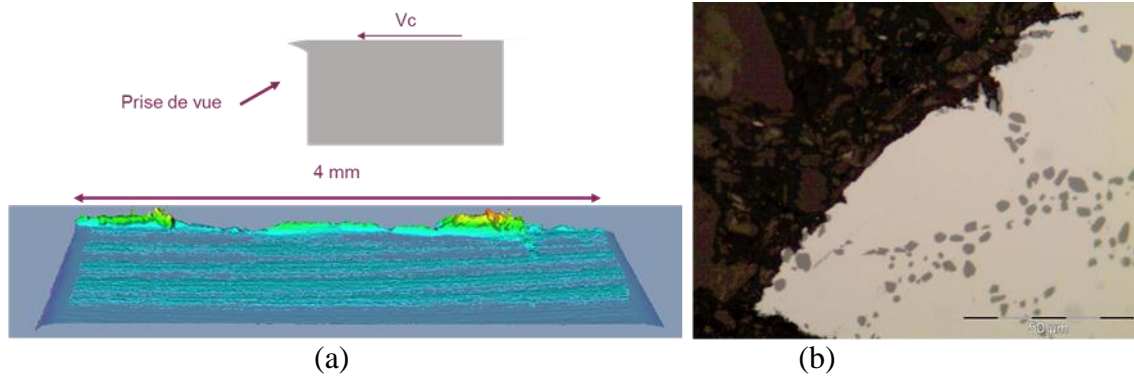


Figure 2 : (a) Représentation 3D d'une bavure mesurée par scan 3D, et (b) micrographie (x50) d'une bavure obtenue lors d'un essai.

De plus, suivant les paramètres de coupe, les bavures formées sont soit des bavures rencontrées dans des matériaux ductiles soit dans des matériaux fragiles, comme le montre la figure 3. Le caractère des bavures en fonction des paramètres de coupe est analysé et est détaillé dans les parties concernées.

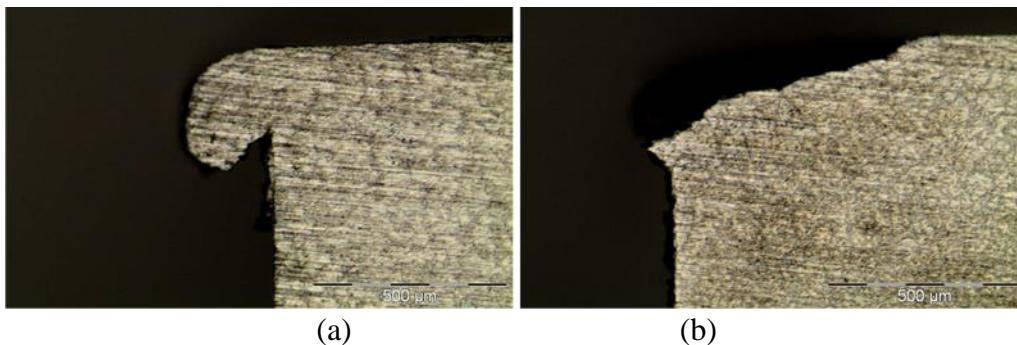


Figure 3 : Micrographies présentant : (a) une bavure de type positive ($\gamma = -5^\circ$; $h = 0,05$ mm ; Lub : Sec ; $R_\beta : 6 \mu\text{m}$), et (b) une bavure de type négative ($\gamma = 20^\circ$; $h = 0,2$ mm ; Lub : Sec ; $R_\beta : 6 \mu\text{m}$)

- Influence de l'épaisseur coupée (h)

L'étude de l'influence de l'épaisseur coupée sur la hauteur des bavures, dont les résultats sont présentés en figure 4, permet de mettre en évidence le même phénomène que Kishimoto et al. (1981) avaient démontré en fraisage. Il existe aussi une l'épaisseur coupée de transition à partir de laquelle la taille des bavures diminue considérablement en coupe orthogonale.

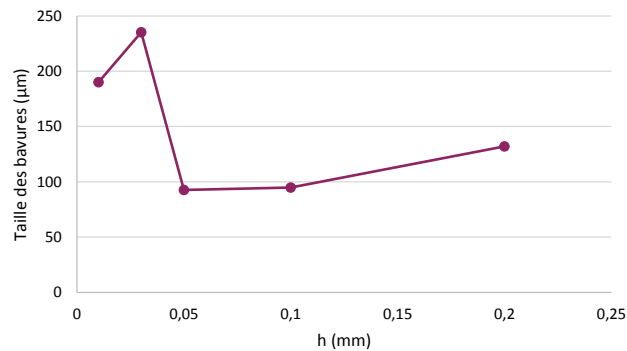


Figure 4 : Influence de l'épaisseur coupée sur la taille des bavures.

Le phénomène physique peut s'expliquer de la même façon, à savoir que si l'épaisseur coupée est faible, une partie du copeau est repoussée et non coupée du fait que l'arête de coupe sort de la matière en même temps que le copeau, provoquant un basculement du copeau et donc une déformation plastique plus élevée. Si l'épaisseur coupée est élevée, l'arête de coupe sortira de la matière sans que le copeau puisse basculer, provoquant une fissuration due à la contrainte de cisaillement trop importante combinée à la direction de coupe, la bavure formée est alors une bavure de déchirement. Cette hypothèse est confirmée à l'aide de micrographies réalisées sur les éprouvettes et représentées en figure 5.

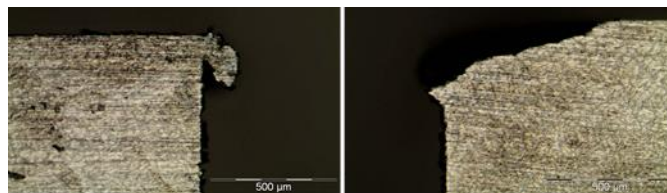


Figure 5 : Micrographies de bavures obtenues pour une épaisseur coupée $h = 0.03$ mm à gauche et 0.2 mm à droite

Lors de la coupe à faibles épaisseurs coupées ($<$ épaisseur de transition), une bavure positive, en forme de copeau non coupé est visible. D'un autre côté, lors de la coupe à fortes épaisseurs coupées, une bavure négative est présente, laissant apparaître en bout une petite zone de déformation plastique.

- Influence de l'angle de coupe (γ)

Des essais sont effectués avec deux angles de coupe différents, un angle négatif (-5°) et un angle positif (7°) permettant d'étudier l'influence de ce paramètre sur la formation des bavures. Il en résulte, comme le montre la figure 4 une forte dépendance de la taille des bavures sur l'angle de coupe. Ces résultats, semblent cohérents, en effet, lorsqu'un angle de coupe négatif est utilisé, le copeau est alors repoussé jusqu'en sortie matière, induisant des efforts plus importants et donc une déformation plastique en bord libre plus

importante. Alors qu'un angle de coupe positif permet de réaliser une coupe plus nette, minimisant les efforts.

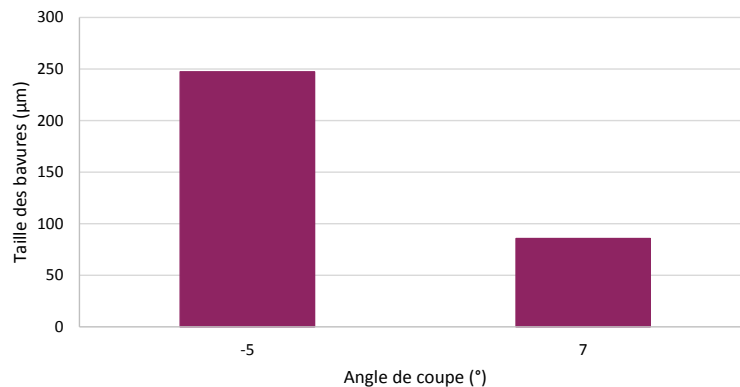


Figure 6 : Influence de l'angle de coupe sur la taille des bavures.

Les micrographies réalisées permettent de valider le phénomène. En utilisant un angle de coupe négatif la morphologie de la bavure est du même type que sur la figure 5 à gauche. En utilisant un angle de coupe positif la bavure est plutôt du type négatif. Ces morphologies sont représentées en figure 7.

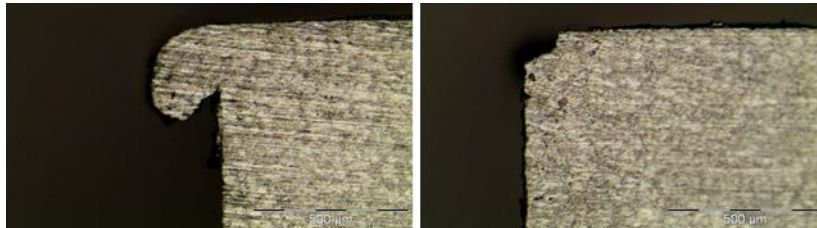


Figure 7 : Micrographies de bavures obtenues pour un angle de coupe négatif (-5°) à gauche et un angle de coupe positif (7°) à droite

Cependant, il serait intéressant d'analyser si une épaisseur coupée de transition existe dans le cas de l'utilisation d'un angle de coupe négatif ce qui ne devrait pas être le cas, étant donné que l'arête de coupe sort toujours en retard par rapport au copeau.

- Influence du fluide de coupe

L'influence du fluide de coupe, représentée en figure 8, montre, que l'utilisation d'une huile entière réduira la taille des bavures. Lorsque l'usinage se fait à sec, le taux de compression du copeau, considéré comme le rapport entre l'épaisseur du copeau et l'épaisseur coupée, est plus élevé que lors de l'utilisation d'une huile (ici : 2.17 à sec contre 1.93 et 1.77 pour une huile soluble et une huile entière). Cependant, si une comparaison doit être faite, l'effet de la lubrification est négligeable par rapport à l'épaisseur coupée ou l'angle de coupe.

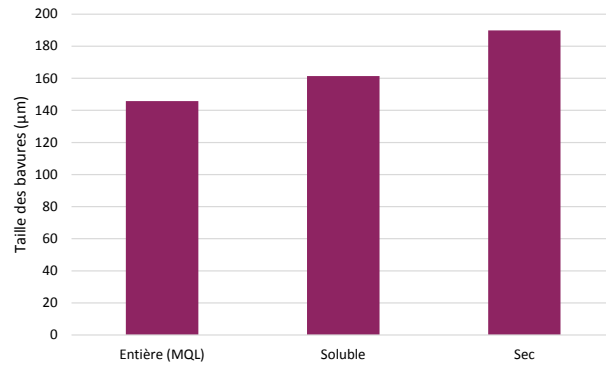


Figure 8 : Influence du type de lubrification sur la taille des bavures.

- Influence de rayon d'arête (r_β)

L'effet de l'augmentation du rayon d'arête est mis en évidence sur la figure 9, En effet, plus la plaquette a un rayon d'acuité élevé, plus la bavure obtenue est importante. Ces résultats peuvent être expliqués par l'influence du rayon d'arête sur les efforts de coupe ou l'orientation de l'effort résultant par rapport à la surface coupée. Cependant, la mesure des efforts lors des essais ne confirme pas cette hypothèse. En effet, la variation d'effort ne dépasse pas les 6% et l'orientation de l'effort résultant 2.5%.

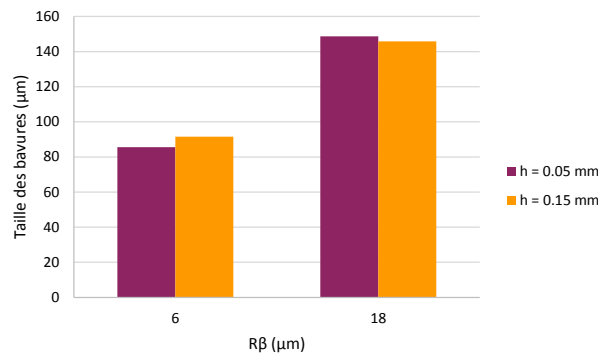


Figure 9 : Influence du rayon d'arête sur la taille des bavures, pour deux épaisseurs coupées.

Une seconde hypothèse est l'effet géométrique induit par le rayon d'arête, provoquant le même phénomène qu'énoncé avec l'effet de l'angle de coupe et l'épaisseur coupée. Lorsque le rayon d'arête est faible, l'arête ne provoque qu'un déchirement sous l'effet de la coupe. Lorsque ce rayon est élevé, le copeau est poussé par l'arête et la bavure formée est plus importante. Cette hypothèse est confortée par l'augmentation du rapport de compression du copeau pour un rayon d'acuité plus élevé, ainsi que par les analyses micrographiques réalisées et présentes en figure 10. Les bavures obtenues lors d'une coupe à faible rayon sont de type négatif contrairement à celles obtenues lors d'une coupe à fort rayon.

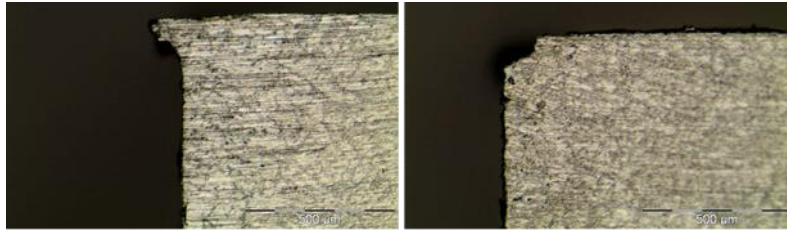


Figure 10 : Micrographies de bavures obtenues pour un rayon d'acuité de 18 µm à gauche et 6 µm à droite

4 Conclusion et perspectives

L'étude présentée permet de comprendre la formation des bavures en fonction de différents paramètres de coupe dans un matériau ductile en compression et fragile en traction. L'influence du caractère hétérogène du matériau sur la formation des bavures a été démontrée, avec notamment une disparité importante de la taille des bavures. L'article met aussi en évidence l'influence de différents paramètres de coupe sur la formation et la taille des bavures. Cette étude aura donc permis de dégager des résultats dont les causes sont à étudier. Une seconde étude, plus poussée sera ainsi réalisée, incluant de la corrélation d'image à l'aide d'une caméra rapide, et de la coupe orthogonale à grande vitesse. Cette future étude se concentrera sur deux matériaux, l'EN – AC AlSi7Mg0,3+0,5Cu - T6 ainsi que l'EN – AC AlCu4Mg. La différence entre les bavures obtenues avec ces deux matériaux sera étudiée.

Références

- Bourlet, Clément, et Guillaume Fromentin. « Analysis and modeling of burr formation during the plane milling of cast aluminum alloy using PCD tools (article soumis) ». *ASME*, 2016.
- Carlos da Silva, Luiz, Paulo Rosa da Mota, Marcio Bacci da Silva, Emmanuel Okechukwu Ezugwu, et Alisson Rocha Machado. « Study of burr height in face milling of PH 13-8 Mo stainless steel– Transition from primary to secondary burr and benefits of deburring between passes. » *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2015.
- Gillespie, LaRoux K. « The Formation and Properties of Machining Burrs, thèse de doctorat. » Utah State University, 1973.
- Hashimura, M., Y. P. Chang, et David Dornfeld. « Analysis of burr formation mechanism in orthogonal cutting ». *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 121 (1999a): 7.
- Hashimura, M., J. Hassamontr, et D. A. Dornfeld. « Effect of In-Plane Exit Angle and Rake Angles on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation ». *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 121 (1999b).

Ko, Sung-Lim, et David A. Dornfeld. « A study on burr formation mechanism. » *Journal of Engineering Materials and Technology* 113 (1991).

NF ISO 13715 : Dessins techniques - Arêtes de formes non définies - Vocabulaire et indication sur les dessins.

Olvera, O., et G. Barrow. « An experimental study of burr formation in square shoulder face milling ». *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 36, n° 9 (1995): 1005-20.

Schafer, F. « Product design influences on deburring ». Technical paper, 1975.

Teruaki, Miyake, Akihiro Yamamoto, Waichiro Kishimoto, Keiichi Yamanaka, et Kensuke Takano. « Study of burr formation in face milling ». *JSPE* 53, n° 1 (1991).

Toropov, A. A., et Sung-Lim Ko. « A new burr formation model for orthogonal cutting of ductile materials ». *Annals of the CIRP* 55/1 (2006).